

绿色建造下预拌混凝土原材料市场发展趋势

丁虎¹, 丁庆军², 林皓望¹, 张珍¹

(1.湖南省第六工程有限公司,湖南长沙 410015;2.武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室,湖北武汉 430070)

摘要:面对泵送混凝土的传统原材料资源枯竭、生产过程能耗大、碳排放高、污染严重等情况以及中国土木工程行业实施绿色建造的大趋势,各种新的原材料逐渐被开发和推广,其质量、产量、社会认可度逐渐提高。优质天然河砂和卵石在原产地供不应求,而老旧淤塞河道中尚可开采;使用大粒径天然卵石、石灰石、建筑垃圾等为原料生产的碎石和机制砂将成为新的替代品。水泥、粉煤灰、粒化高炉矿渣粉等原材料在生产企业进行转型升级并倾向于在交通便利地区集中建厂的过程中,导致平原、丘陵、山地等区域间供应不均衡的问题,因此,需根据施工所在地的供料情况,采取就地取材的策略。聚羧酸型缓凝高效减水剂以其高效、经济、相容性高、施工方便等优点已普及市场,还需进一步提升与机制砂等材料的适应性;而钙系和镁系膨胀剂对混凝土的补偿收缩需确保与混凝土收缩同步以控制收缩裂缝并避免结构胀裂。配制泵送混凝土需站在建筑全寿命周期的高度考察和改进各种原材料的性能并充分发挥原材料之间的组合效应。

关键词:泵送混凝土原材料;资源枯竭;绿色建造;就地取材;环境保护

中图分类号:U418

文献标志码:A

Development Trend on Raw Materials Market of Ready-Mixed Concrete under Green Construction

DING Hu¹, DING Qingjun², LIN Haojun¹, ZHANG Zhen¹

(1.Hunan No. 6 Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410015, China;2.State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan,Hubei 430070, China)

Abstract: In the face of resource depletion, high energy consumption in production, high carbon emissions, and serious pollution brought by traditional pumpcrete raw materials, a variety of new raw materials have been gradually developed and promoted to conform with the green construction promoted by China's civil engineering industry, witnessing a stable increase in quality, output, and social recognition. High-quality natural river sand and pebbles are in short supply at the origin, and they can be explored in old silted river channels. Gravel and manufactured sand produced using large particle size natural pebbles, limestone, construction waste, and others as raw materials will become new substitutes. In the transformation and upgrading of production enterprises which tend to build factories in areas with transportation convenience, raw materials including cement, fly ash, and granulated blast furnace slag powder will cause uneven supply in plains, hills, mountains, and other terrains. Therefore, it is required to use local materials according to the situation in the construction site. Polycarboxylic set retarding superplasticizer, though already popularized in the market for its high efficiency, low cost, high compatibility, and convenience in construction, still needs to be more compatible with manufactured sand and other materials. The compensation shrinkage of concrete by calcium and magnesium expansion agents should be synchronized with concrete shrinkage to control shrinkage cracks and avoid structural cracking. In the preparation

收稿日期:2024-09-08(修改稿)

基金项目:国家十三五重点研发计划项目(编号:2017YFB0310105);湖南建设投资集团有限责任公司2022年度科技计划项目(编号:JGJTK2022-09)

作者简介:丁虎,男,硕士,高级工程师/国家一级注册建造师.E-mail:30468971@qq.com

of pumpcrete, the investigation at the height of the life cycle of buildings, the improvement of the performance of various raw materials, and the utilization of the combination effects of raw materials are all necessary.

Keywords: pumpcrete raw materials; resource depletion; green construction; local materials; environmental protection

0 引言

21世纪以来由于中国土木工程建设的飞速发展以及泵送混凝土原材料的性能指标要求较高,传统的原材料供应日益紧张,在部分地区临近枯竭,同时其开采过程给环境带来的污染和破坏日益显现。以天然河砂和卵石为例,中国砂石需求量从2007年的102亿t增至近年来的200亿t左右^[1-3],而长期过度开采将导致桥涵基础、河堤、水闸等冲刷严重,存在坍塌隐患^[4];采挖留下的深坑引起旋涡,易影响通航安全;砂石层及之上的淤泥质黏土被破坏后将影响水生动植物的生态平衡^[5]和湖床的过滤降解功能^[6]。为此,各级政府部门相继出台相关法律、法规、通知和公告,停止、限制采挖。传统建筑材料在生产和运输过程中大量消耗能源,排放CO₂,产生垃圾。包括基础设施建设在内的中国建筑全过程能耗由2005年的9.34亿t标准煤上升到2021年的23.5亿t标准煤,2021年碳排放总量为50.1亿t,其中的建材生产阶段碳排放17.0亿t(CO₂),占全国碳排放总量的16.0%,占全过程碳排放的41.8%^[7-9]。以水泥为例,作为泵送混凝土碳排放量占比最大的原材料,中国水泥行业CO₂排放量近20年来呈波浪形陡增直至2022年的12.78亿t^[10],并于2020年达历史最高峰14.29亿t,占当年中国总碳排放量的13%^[11],其中熟料生产过程中碳排放约占水泥碳排放的92%(部分文献误引用为60%~75%)^[12]。同时,中国建筑垃圾的年产量超20亿t,约占城市生活垃圾的35%,但综合利用率仅为40%^[13],连同粉煤灰、高炉矿渣、石粉等工业垃圾占用大量土地,造成巨大的环境污染。为节约资源,保护环境,最大限度地实现人与自然和谐共生,中国实施绿色建造和绿色施工,并制定双碳战略,各级部门相继出台并逐步完善相关技术导则、施工规范、计算标准、评价标准等^[14-20]。其中,混凝土性能的评定标准在过去的强度指标基础上增加了外观、耐久性等方面,评价周期也从过去的28d、竣工后3~5年的保质期延伸到了建筑结构的全寿命周期。如何消纳

工业废料和建筑垃圾,开发普及新的原材料,合理降低建材生产和运输的能耗,发展“低碳混凝土”^[21-23],成为中国泵送混凝土建材行业绿色发展的主流方向。

1 天然河砂和卵石

平原区域内的大江大河中下游以及大型湖泊中的河砂和卵石,由于历经水流长距离搬运及反复冲刷,留下的多为致密坚硬、形状圆润、表面光滑、吸水率低、酸碱适中的组分,且级配连续。用其配制的泵送混凝土工作性能和力学性能俱佳;同时其在河床湖底的分层分布相对集中,利于大规模集中开采和运输。河流的上游一般位于山地区域,海拔越高的山地区域内,溪流、小河中的河砂和卵石所含强风化颗粒越多,压碎值指标越高,形状越尖锐,表面越粗糙。相比平原的大江大河,山地区域内的河砂及卵石产量少,且质量相对不稳定,同一河道距离较近的两段河床中的原材料各项指标有可能相差很大。河道越上游的区段,全年水位变化越大,洪水及枯水季节内砂石开采均受较大影响。由于产量少,一般砂石场多将卵石混合堆放,未按孔径大小分级储存,并且普遍供不应求,出厂价较高。丘陵区域内河砂和卵石的整体质量及产量介于平原和山地区域之间。目前,老旧淤塞河道内及两岸丘陵山坡上尚有较大储量的天然河砂和卵石可供开采,但含泥量相对较大,杂质较多,应加强监管,水洗干净后再用于施工现场。山地区域内坚固性较低、形状较尖锐的河砂,如果比较需外运进场的优质河砂后,有运距和可持续供应的优势,并可通过优化配合比,例如加大胶凝材料用量后能保证泵送混凝土的工作性质、强度、经济性,则存在开采利用的价值^[24-25]。

2 碎石、机制砂和石粉

目前,各地多以石灰岩为原料破碎筛分成碎石和机制砂用于配制各种强度等级的混凝土,这已是替代天然河砂和卵石的大势所趋。此外,盛产天然

河砂和卵石的河道由于多年的开采,两侧河岸及周边堆积有大量土木工程不常用的粒径在100 mm以上的天然卵石,主要成分为石英晶体、云母和方解石等,近年来以其为原料加工成的破碎卵石和机制砂多用于C40及以下强度等级的混凝土。相比石灰岩,以大粒径卵石为原料生产的粗细集料还需提高市场认可度,由于后者破碎成的碎石色彩丰富,不如前者色泽单一,常引起质量不均匀的误解;后者破碎成的机制砂与天然河砂外观极为相似,但性质有差别,若同一工地的料场存放这两种砂,在实际操作中易出现混用的情况。对此,建议加强市场监督和施工现场管理,用混凝土质量合格的事实说话,普及使用破碎卵石及其机制砂。各地区目前料源整体充足,但由于需求量和交通运输情况差异较大,因此厂家投入的设备与供货辐射的范围相关。目前市场上碎石的差异主要体现在形状上。母岩经鄂式、圆锥式或对辊式破碎机破碎后,部分厂家并未进一步使用冲击式或反击式破碎机细碎整形成形状方正的粗集料;个别地区仍然使用落后的锤式破碎机从而导致针片状含量较高。碎石的最大公称粒径越小,对提高混凝土的强度和性能越有利,因其可使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的不定向排列程度增大,粗集料与水泥浆体的黏结增强,混凝土材料内部结构的连续性提升,并且粗集料对水泥收缩约束作用变大。近年来,碎石在配制C80及以上混凝土时的最大公称粒径普遍在19 mm及以下,配制C100及以上混凝土时的最大公称粒径普遍在16 mm及以下,但目前市场上碎石的针片状含量随最大公称粒径减小而增大,粗糙加工的碎石往往在最大公称粒径降低到16 mm时就会导致混凝土泌水明显,扩散性显著降低。辉绿岩相较于石灰岩,耐磨性和耐腐蚀性明显较高,更适于配制高强及超高强混凝土;另外,C150超高强混凝土的集料有选用最大公称粒径不超过8 mm的玄武岩碎石^[26]或者1 mm的石英砂配制^[27],但以上3种原材料目前市面上并未广泛生产,建议混凝土生产方参与从选定母岩到考察加工厂家的全过程,严格把控质量。机制砂的差异主要体现在石粉的含量,部分厂家未分离石粉,常导致机制砂中石粉含量过高而对混凝土泵送性能造成负面影响。建议使用干法破碎,负压抽吸调整集料中的石粉含量,在节约水资源、保护环境的同时,又可利用石粉作为掺合料代替部分胶凝材料。

普遍认为,机制砂中石粉含量为8%~10%时,能最有效地填充集料间空隙,提高混凝土泵送和耐久性能^[28-33]。从建筑结构全寿命周期考虑,应将粗细集料视为活性材料而非传统观点的惰性材料。混凝土的体积稳定性需考虑“碱-骨料反应”等,集料需选择没有潜在活性的母岩加工。近年来,将拆除后的混凝土和砌体构件破碎、清洗、分级而成的再生集料已逐渐用于低强度等级、非承重结构混凝土。若能根据混凝土和砌体的原有强度等级先分类后再加工,进而用于配制不同强度等级的混凝土,则可使建筑垃圾更加充分地发挥作用。因此,各地宜以市县或地区为单位实施信息化管理,保证原材料数量和种类的充分供应,将长远规划建设所需的集料情况上传大数据信息管理系统,就地取材使用石灰岩、大粒径卵石、建筑垃圾等为原料,分期分地区统一调配资源,有利于厂家购置并及时更新全套设备,细分集料种类,提高质量和产量,同时也可降低施工需求方的分摊费用。

3 水泥

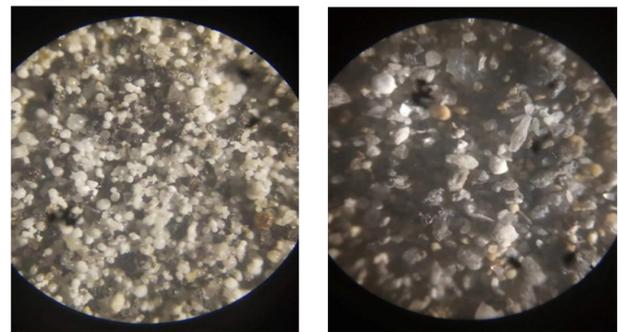
21世纪以来,中国水泥行业稳步进行技术改造和产能升级^[34-37],水泥质量越来越稳定,其中强度指标在满足国标的基础上,近年的富余系数相比2010年以前明显降低。P•O42.5的成分最为稳定,与外加剂的相容性最佳;而P•O52.5相比P•O42.5,有的厂家提高了熟料的比例,有的厂家则将P•O42.5进一步磨细,有的厂家则两种方法兼用;P•C32.5相比P•O42.5,冶炼设备和生产工艺更加多样化,混合材料比例较高,各种粒化高炉矿渣、粉煤灰、粒化铁炉渣、精炼铬铁渣、石灰石、砂岩以及火山灰质混合料等的活性相差大。这些因素导致不同厂家生产的P•O52.5、P•C32.5水泥性能相差较大。纵观2010年以来的水泥市场整体需求量^[38-39],P•O42.5的市场占比最高;P•O52.5多用于配置C55及以上强度等级的混凝土,一般只有大型水泥厂可长期稳定供应,而大型水泥厂的建设选址多考虑交通便利、可辐射周边大中型城市以及基建密集的地点,因此偏远地区的工程项目使用P•O52.5时存在运输不便的不利因素;P•C32.5水泥主要用于配制砂浆以及临时结构的低强度等级混凝土;中低热水泥、硫酸盐水泥等特种水泥在基础建设工程密度小、交通不便的地区一般需要预订。与此相应,P•O42.5价格相对稳定,而

P·O52.5 短期内也有可能浮动较大,比 P·O42.5 高 30~120 元/t,给施工概预算带来一定影响。因为水泥工业的碳排放主要来自熟料生产,所以增加混合材料比例,在改善水泥性能的同时确实是降本减碳的有效方法,而目前试配混凝土时针对胶凝材料和外加剂的相容性,一般由外加剂厂家根据胶凝材料的特性调整配方,因此,水泥厂使用稳定的配方和生产工艺是保证施工现场混凝土性能长期稳定的必要条件之一。另外,考虑建筑结构全寿命周期内混凝土的体积稳定性,需控制熟料和混合料中的游离 CaO 含量及 K^+ 、 Na^+ 等离子碱含量,提高粉煤灰、矿粉等混合料的比例。但是,水泥厂相对电厂、金属冶炼厂等的地域分布更分散,在山地区域等交通不便的地区,外运粉煤灰、矿粉等混凝土掺合料进入施工点的运费较高,若就地取材,胶凝材料仅使用水泥,在混凝土达到同等强度的前提下,水泥强度等级越低,所需用量就越高,越有利于提高新拌混凝土的泵送性能,因此仍有保留生产 P·C32.5 水泥的必要^[24]。由于水泥的保质期相对较短,一般有效期在 3 个月以内,因此建议水泥生产方与上游原材料供应商和下游混凝土生产企业,以及外加剂厂商共同建立数据库、物联网、实施信息管理系统和集约化生产,对各种型号尤其是需求量较少的水泥品种进行针对性生产,保质定量的同时稳定市场价格。

4 粉煤灰

粉煤灰是传统“变废为宝”的建筑材料,作为工业燃煤的副产品,挤占土地的同时对空气、水体、土壤均有污染,然而粉煤灰中的玻璃微珠发挥“滚珠效应”可提高新拌混凝土泵送性能;粉煤灰部分替代水泥还可降低混凝土水化热总量,推迟放热高峰期;其中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 CaO 等活性成分经二次水化反应后可大幅提高硬化混凝土后期强度,水化后的胶凝体可有效填充混凝土空隙,使其更加密实,增强抗渗、抗冻、抗碳化等耐久性能。此外,粉煤灰代替水泥,可显著降低泵送混凝土原材料生产阶段的碳排放。因此,粉煤灰被广泛用作水泥的混合料和混凝土的掺合料,特别在配制高强高性能混凝土时,Ⅰ级灰和超细灰更能发挥显著作用。近 20 年来,Ⅱ级及以上等级的粉煤灰供不应求,Ⅲ级及等外灰经常滞销。面对这一市场状况,不少粉煤灰供货

方将Ⅲ级灰甚至等外灰磨细后当Ⅱ级灰出售。相比经过充分燃烧、高温反应后的粉煤灰,磨细后的粉煤灰形状尖锐(图 1),无论是玻璃微珠效应还是化学活性均没有明显提高,导致目前市场上相当比例的Ⅱ级灰即使检测指标合格,但富余并不高,用之配制的泵送混凝土尤其是高强高性能混凝土的各项性能指标往往与预期效果存在相当大的差距。目前,诸多火力发电厂、金属冶炼厂等粉煤灰供货方一般位于交通便利的平原、丘陵地区,并且常常向水泥厂、商混站等大批量需求方直接供货,导致位于交通不便的偏远地区、需要自行建站的施工方项目部等散户难以在市场上购买,或者被迫高价买入。建议粉煤灰供应方与砌体、混凝土预制构件等生产企业以及路面铺筑施工方等联合,实行集约化管理,将Ⅲ级及等外灰作为惰性掺合料使用,将Ⅰ级、超细粉煤灰(微珠)集中供给于配制高强、超高强混凝土;工程建设、施工等需求方应根据混凝土的设计要求以及项目所在地的供货水平就地取材,当Ⅱ级及以上灰供应紧张时选择矿粉、低温稻壳灰等其他掺合料。



(a) 高温充分燃烧反应
(玻璃微珠含量高)

(b) 低等级粉煤灰磨细
(玻璃微珠含量少)

图 1 天然粉煤灰与磨细粉煤灰对比

Figure 1 Comparison between natural fly ash and finely ground fly ash

5 粒化高炉矿渣粉

粒化高炉矿渣粉(简称矿粉)与水泥化学成分相似,自身具有水化水硬特性,可作为混凝土掺合料,部分替代水泥的同时提高新拌混凝土的泵送性能,提高硬化混凝土的后期强度以及抗渗性能,降低其水化热。若矿粉与粉煤灰双掺,则可进一步减少新拌混凝土的坍落度损失,而不明显降低硬化混凝土早期强度,还可进一步降低混凝土收缩,提高抗渗、

抗冻等耐久性能。此外,矿粉代替水泥,可显著降低泵送混凝土原材料生产阶段的碳排放。矿粉作为生铁冶炼的副产品,与生铁产量息息相关。根据国家统计局数据显示:中国生铁产量由2010年的6.0亿t增长到2022年的6.9亿t,连续13年稳居世界第一,每生产1t生铁可产出矿粉0.25~0.35 t^[40],中国矿粉年产量可达数亿吨。自2010年以来,粉磨技术取得突破性进展,国产立磨设备迅速普及,矿粉质量稳定性不断上升,经济粉磨细度目前已达400 m²/kg以上^[41],矿渣利用率显著提高,价格呈波浪形持续下降^[40],之前使用钢渣以假乱真的现象由此得到一定抑制。综合考虑建筑物全寿命周期内的混凝土综合成本,随着泵送混凝土向更高强度、更高性能方向发展,经济粉磨细度应同步提高,粉磨技术设备需随之更新换代。目前,矿粉市场除少数偏远地区外,整体供应稳定,并有部分出口国际市场^[40-41],并且价格方面远比水泥和粉煤灰稳定。中国矿粉的现行检测标准暂未对氧化铝、氧化镁的含量做出规定,但随着水泥混合料、混凝土掺合料来源的多样性,以及外加剂配方的更新换代,其是否对新拌混凝土的保坍性能、凝结时间以及硬化混凝土的体积稳定性有负面影响^[40],需进一步试验分析。

除目前已普遍使用的粉煤灰、矿粉以外,煤矸石、钢渣、玻璃、陶瓷、偏高岭土、低温稻壳灰等工农业废料也有与水泥相似的化学成分,用作水泥混合料以及混凝土掺合料也值得进一步开发普及。建议在这些原材料开发之初,尚未批量供应的阶段,由于其来源多样且产量大小不一,因此应严格筛选来源厂家并加大检测频率,分批检测化学成分,据此适时调整水泥的配方和混凝土的配合比。

6 外加剂

近年来,泵送混凝土外加剂的整体研发趋势向着高效、复合型发展,即融合高效减水、引气、保坍、缓凝等多种功能,同一品种针对施工现场不同强度等级的混凝土仅改变掺量即可,这样方便了现场操作。其中,聚羧酸型缓凝高效减水剂是当前泵送混凝土使用最广的外加剂,具有低掺量、高减水、高保坍、低收缩以及经济环保等优点。随着近十年来中国石化工业的发展和生产设备全面国产化,聚羧酸型外加剂已迅速取代萘系磺酸盐甲醛缩合物外加剂

成为第三代外加剂。近年来,水泥的质量稳定性不断提高,这也进一步提升了聚羧酸型外加剂与水泥的相容性。目前,市场上聚羧酸型外加剂供应充足,价格合理。针对碎石、机制砂正逐步替代天然卵石、河砂的趋势,建议聚羧酸型外加剂进一步研发推广抗泥型、抗石粉型等品种,提高与集料的适应性。目前,业内常用的膨胀剂主要包括CaO系列和MgO系列,多添加于有抗渗要求的地下结构、膨胀后浇带、超长结构等混凝土中以控制裂缝的产生和发展,然而当掺量接近厂家推荐值的上限后,常对混凝土后期的体积稳定性造成不同程度的负面影响^[42-43]。若混凝土还属于高强混凝土,水灰比低,胶凝材料水化反应后混凝土内部毛细孔失水形成负压作用于水泥石,则反而降低补偿收缩的效果,甚至产生混凝土开裂的隐患^[44]。因此,膨胀剂与内养护剂(例如低温稻壳灰等)复掺是一种较理想的用于降低混凝土尤其是高强高性能混凝土自收缩的方法^[42]。同时,膨胀剂还应该建筑全寿命期内使其补偿收缩与混凝土收缩同幅度发展,既要避免前期因补偿过小未能阻止混凝土收缩开裂,又要避免在后期掺量过多使混凝土胀裂。

7 结论与展望

7.1 结论

绿色建造的大趋势下,面对泵送混凝土需求量持续增长和传统天然原材料供不应求的矛盾,各种新型原材料被逐渐开发并推广,其质量、产量、社会认可度随彼此的提高而持续提高。就地取材,在拟建工程所在地开发新的料源产区,以及使用当地工农业废料、建筑垃圾等加工成泵送混凝土原材料,不仅消纳了工业垃圾,保护了环境,而且相比传统原材料的开采、破碎、冶炼、运输等全过程,显著降低了能耗和碳排放。泵送混凝土的配制,应站在建筑结构全寿命期的高度来考察和改进每种材料的性能并充分发挥各种原材料之间的组合效应。

7.2 展望

政府需统筹规划,对泵送混凝土原材料研发机构及生产企业给予政策倾斜和金融优惠。混凝土原材料各上下游企业之间应实施信息化和集约化管理,进行绿色化和工业化生产,以保证工农业废料和建筑垃圾从产生到被加工成混凝土原材料,再运往

商品混凝土站和预制构件生产企业的全过程能连贯进行,既能保证混凝土质量,又能减少各环节的材料损耗,同时还能节约储存场地,降低环境污染,最终形成绿色建材的产业化模式。工程项目的建设和施工单位须根据设计及施工要求,综合考虑项目所在地的原材料特点和交通运输条件,站在建筑全寿命期的高度来优选原材料,优化配合比,改进施工组织设计。现行的原材料检测、配合比设计、混凝土质量评定等规范规程应针对新材料及时更新完善。

参考文献:

References:

- [1] 中国砂石协会. 2023年中国砂石行业运行报告[EB/OL]. (2024-01-29) [2024-05-07]. baijiahao. baidu. com/s? id=1789409058125858980&wfr=spider&for=pc. China Sand and Gravel Association. Operation report of China sand and gravel industry in 2023[EB/OL]. (2024-01-29) [2024-05-07]. baijiahao. baidu. com/s? id=1789409058125858980&wfr=spider&for=pc.
- [2] 崔军,徐迅,游潘丽,等. 建筑用砂石资源短缺现状及对策思考[J]. 混凝土与水泥制品,2023(2):94-97. CUI Jun, XU Xun, YOU Panli, et al. Current situation and countermeasures of the shortage of the sand and stone resource for construction[J]. China Concrete and Cement Products,2023(2):94-97.
- [3] 王稷良,马文辉,徐伟东,等. 煤矸石混凝土性能研究现状[J]. 中外公路,2024,44(4):104-114. WANG Jiliang, MA Wenhui, XU Weidong, et al. Research on performance of coal gangue concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(4):104-114.
- [4] 王国栋,杨文俊. 河道采砂对河道及涉水建筑物的影响研究[J]. 人民长江,2013,44(15):69-72. WANG Guodong, YANG Wenjun. Research review on impact of sand mining on river channel and water involved structures[J]. Yangtze River,2013,44(15):69-72.
- [5] KUMAR N, KUMAR A. Floristic diversity assessment in river sand mining near palri bhoptan village, kisangarh tehsil, Ajmer district, Rajasthan, India[J]. Asian Journal of Earth Sciences,2014,7(2):51-59.
- [6] 吴娟,张奇,李云良,等. 鄱阳湖洪泛系统水位-面积迟滞关系的形成机制及演变[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(10):2155-2165. WU Juan, ZHANG Qi, LI Yunliang, et al. Formation mechanism and evolution of stage-area hysteretic relationships in floodplain system of Poyang Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2022,31(10):2155-2165.
- [7] 人民网. 中国建筑节能协会吴景山:我国建筑行业节能降碳已进入“存量与增量并重”阶段[EB/OL]. (2023-12-29) [2024-05-07]. https://baijiahao. baidu. com/s? id=1786600191481821650&wfr=spider&for=pc. People's Daily Online. Wu Jingshan, China Association of Building Energy Efficiency: China's construction industry energy conservation and carbon reduction has entered a stage of "stock and increment" [EB/OL]. (2023-12-29) [2024-05-07]. https://baijiahao. baidu. com/s? id=1786600191481821650&wfr=spider&for=pc.
- [8] 中国建筑节能协会. 2022中国建筑能耗与碳排放研究报告[EB/OL]. (2023-01-01) [2024-05-07]. https://www. xdyanbao. com/doc/9kvzywjuqn?bd_vid=7377533082197116435. China Association of Building Energy Efficiency. 2022 China building energy consumption and carbon emissions study[EB/OL]. (2023-01-01) [2024-05-07]. https://www. xdyanbao. com/doc/9kvzywjuqn? bd_vid=7377533082197116435.
- [9] 吴松,隋杰礼,任攀攀,等. 基于“双碳目标”的建筑垃圾处置策略初探[J]. 江西建材,2021(10):307-309. WU Song, SUI Jieli, REN Panpan, et al. Preliminary study on construction waste disposal strategy based on "double carbon target"[J]. Jiangxi Building Materials,2021(10):307-309.
- [10] 李超. “双碳”背景下低碳水泥的发展现状[J]. 混凝土世界, 2023(10):80-85. LI Chao. Status of low-carbon cement in the context of "carbon peaking and carbon neutrality"[J]. China Concrete, 2023(10):80-85.
- [11] 水泥网. 绿色发展潮起 水泥行业碳减排在行动[EB/OL]. (2024-02-04) [2024-04-28]. https://www. ccement. com/news/content/47038056554675001.html. Cement mesh. Green development tide the cement industry in action to reduce emissions[EB/OL]. (2024-02-04) [2024-04-28]. https://www. ccement. com/news/content/47038056554675001.html.
- [12] 丁美荣. 水泥行业碳排放现状分析与减排关键路径探讨[J]. 中国水泥,2021(7):46-49. DING Meirong. Analysis on the present situation of carbon emission in cement industry and discussion on the key path of emission reduction[J]. China Cement,2021(7):46-49.
- [13] 李臻昭,郑锋. 建筑垃圾的非法处理风险及多主体监管策略:基于深圳建筑垃圾堆放场重大滑坡事故的分析[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版),2022,35(5):35-41.

- LI Zhenzhao, ZHENG Feng. Risks of illegal disposal of construction waste and its multi-agent supervision strategy: Based on the analysis of the big landslide accident of garbage dump site in Shenzhen[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Social Sciences Edition),2022,35(5):35-41.
- [14] 中国建筑股份有限公司,中国建筑技术集团有限公司. 建筑工程绿色施工规范:GB/T 50905—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- China State Construction Engineering Corporation, China Building Technique Group Co., Ltd.. Code for green construction of building: GB/T 50905—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014.
- [15] 长沙理工大学,湖南省建筑设计院有限公司,中机国际工程设计研究院有限责任公司. 湖南省绿色建筑评价标准:DBJ 43/T 357—2020[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- Changsha University of Science & Engineering, Hunan Province Architectural Design Institute Co., Ltd., China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd.. Assessment standard for green building in Hunan Province:DBJ 43/T 357—2020[S].Beijing:China Architecture and Construction Press,2015.
- [16] 湖南建工集团有限公司. 湖南省建筑工程绿色施工评价标准:DBJ 43/T 101—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Hunan Construction Group Co., Ltd.. Evaluation standard for green construction of building in Hunan province:DBJ 43/T 101—2017[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press,2017.
- [17] 中国建设科学研究院有限公司,上海市建筑科学研究院(集团有限公司). 绿色建筑评价标准:GB/T 50378—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- China Academamy of Building Reasearch, Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd.. Assessment standard for green building:GB/T 50378—2019[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2019.
- [18] 中国建筑科学研究院有限公司,中国建筑标准设计研究院有限公司. 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- China Academamy of Building Reasearch,China Institute of Building Standard Design & Research. Standard for building carbon emission calculation:GB/T 51366—2019[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2019.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿色建造技术导则(试行)[Z],2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical guidelines for green construction (Trial)[Z],2021.
- [20] 中国建筑股份有限公司,中国建筑第八工程局有限公司. 建筑与市政工程绿色施工评价标准:GB/T 50640—2023[S].北京:中国计划出版社,2023.
- China State Construction Engineering Corporation, China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd.. Evaluation standard for green construction of building and municipal engineering:GB/T 50640—2023[S].Beijing: China Planning Press,2023.
- [21] 程培峰,白月,李艺铭,等. 玉米秸秆油对老化沥青流变性能的影响及其再生效果研究[J/OL]. 中外公路,1-15[2024-02-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240201.1012.002.html>.
- CHENG Peifeng, BAI Yue, LI Yiming, et al. Study on the effect of corn stover oil on the rheological properties of aged asphalt and its regeneration effect[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-15[2024-02-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240201.1012.002.html>.
- [22] 吴文贵,张红,师海霞.“十四五”对“低碳混凝土”呼唤与期待[J]. 混凝土世界,2022(1):19-24.
- WU Wengui, ZHANG Hong, SHI Haixia. The call and expectation of “low carbon concrete” during the 14th five-year plan[J].China Concrete,2022(1):19-24.
- [23] 张红.“双碳”目标下混凝土行业的高质量发展之路[J]. 混凝土世界,2021(9):14-17.
- ZHANG Hong. The road of high-quality development of concrete industry under the goal of “double carbon” [J]. China Concrete,2021(9):14-17.
- [24] 丁虎,张勇,余高,等. 浅谈低强度等级水泥配制山区泵送混凝土的综合优势[J]. 公路,2013,58(2):175-179.
- DING Hu, ZHANG Yong, YU Gao, et al. Comprehensive advantages of low strength grade cement preparation of mountain pumped concrete [J].Highway,2013,58(2):175-179.
- [25] 丁虎,张勇,余高,等. 浅谈配制远距离、高扬程C50泵送混凝土时使用P·O 42.5级较于P·O 52.5级的综合优势[J]. 混凝土,2012(7):102-105.
- DING Hu,ZHANG Yong,YU Gao,et al.Discuss on making the long range and high lift of C50 pumping concrete that the comprehensive superiority when use P·O 42.5 than P·O 52.5 cement[J].Concrete,2012(7):102-105.
- [26] 黄政宇,李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):47-54.
- HUANG Zhengyu, LI Shigen. Study on mechanical properties of ultra high performance concrete with coarse aggregate[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(3):47-54.
- [27] 方志,周腾,刘路明,等. 超高性能混凝土受拉性能试验研究[J]. 铁道学报,2022,44(5):157-165.
- FANG Zhi, ZHOU Teng, LIU Luming, et al. Experimental study on tensile properties of ultra-high performance concrete[J].Journal of the China Railway Society,2022,44

- (5):157-165.
- [28] 刘全升,卢凤莲,刘仲基.石粉含量对机制砂自密实混凝土耐久性的影响[J].混凝土,2023(5):92-95.
LIU Quansheng, LU Fenglian, LIU Zhongji. Influence of stone powder content on the durability of machine-made sand self compacting concrete[J].Concrete,2023(5):92-95.
- [29] 张凯,李北星,李广,等.片麻岩石粉掺入方式对混凝土性能的影响[J].水利水电技术(中英文),2023,54(1):187-198.
ZHANG Kai, LI Beixing, LI Guang, et al. Effect of gneiss powder mixing mode on concrete performance[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(1):187-198.
- [30] 姚越,左彦峰,宋天威,等.机制砂对混凝土性能的影响研究综述[J].混凝土世界,2023(6):71-76.
YAO Yue, ZUO Yanfeng, SONG Tianwei, et al. Effect of machine-made sand on the properties of concrete[J].China Concrete,2023(6):71-76.
- [31] 刘文浩,卿迟,冯前进,等.机制砂石粉参数对混凝土性能的影响[J].武汉理工大学学报,2023,45(3):31-38,62.
LIU Wenhao, QING Chi, FENG Qianjin, et al. Effects of physical and chemical parameters of mechanized sand on concrete properties[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2023,45(3):31-38,62.
- [32] 赵翔宇.石粉含量对高性能混凝土性能的应用研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(2):30-33.
ZHAO Xiangyu. Study on the application of stone powder content to the performance of high performance concrete [J].Communications Science and Technology Heilongjiang, 2023,46(2):30-33.
- [33] 刘凯,张海政,宋正林,等.高石粉机制砂C60自密实混凝土的制备与应用[J].混凝土,2019(11):141-144,
LIU Kai, ZHANG Haizheng, SONG Zhenglin, et al. Preparation and application of C60 self-compacting concrete using manufactured sand with high content stone powder[J].Concrete,2019(11):141-144,148.
- [34] 刘云.节能低碳发展 创新应用担当:中国水泥协会特种水泥分会工作总结(2022年及2023年)(下)[J].中国水泥,2024(2):34-38.
LIU Yun. Energy saving and low-carbon development innovation and application: Summary of special cement branch of China cement association (2022 and 2023)(part II)[J].China Cement,2024(2):34-38.
- [35] 赵少鑫.新型工业化背景下的建材行业智能制造转型[J].新型工业化,2024,14(2):10-20.
ZHAO Shaoxin. Intelligent manufacturing transformation in the building materials industry under the background of new industrialization[J]. The Journal of New Industrialization,2024,14(2):10-20.
- [36] 郑龙,陈峰,严旭.技术创新与数字化转型在混凝土与水泥制品行业中的作用及策略[J].混凝土世界,2023(9):86-89.
ZHENG Long, CHEN Feng, YAN Xu. The role and strategies of technological innovation and digital transformation in the concrete and cement-based products industry[J].China Concrete,2023(9):86-89.
- [37] 周刚.新型干法水泥生产技术的现状及发展前景分析[J].工程技术研究,2022,7(12):83-85.
ZHOU Gang. Current situation and development prospect of new dry process cement production technology[J]. Engineering and Technological Research,2022,7(12):83-85.
- [38] CBMF.2022年水泥行业经济运行形势分析[J].中国建材,2023,72(3):72-75.
CBMF. Cement industry operating situation in 2022[J]. China Building Materials,2023,72(3):72-75.
- [39] 中国混凝土与水泥制品协会.2023年上半年混凝土与水泥制品行业运行分析[J].混凝土世界,2023(9):7-12.
CCPA. Analysis of the concrete and cement products industry operation in the first half of 2023[J]. China Concrete,2023(9):7-12.
- [40] 陈玉,曾庆东,ANTUNES R.国内外粒化高炉矿渣粉标准及产业发展概况(下)[J].混凝土世界,2018(5):14-25.
CHEN Yu, ZENG Qingdong, ANTUNES R. Granulated blast furnace slag powder standards home and abroad and industry development overview(part II)[J].China Concrete, 2018(5):14-25.
- [41] 曹忠露,陈平,刘学文,等.不同环境下酸性闪长岩沥青混合料长期水稳性能评价研究[J].中外公路,2024,44(2):75-81.
CAO Zhonglu, CHEN Ping, LIU Xuewen, et al. Evaluation of long-term water stability of acidic diorite asphalt mixtures in different environments[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(2):75-81.
- [42] 刘路明,方志,黄政宇,等.膨胀剂与内养剂对超高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(11):1706-1715.
LIU Luming, FANG Zhi, HUANG Zhengyu, et al. Effects of expansive agent and super-absorbent polymer on performance of ultra-high performance concrete[J].Journal of the Chinese Ceramic Society,2020,48(11):1706-1715.
- [43] 杨东洋,曹鸿猷,黄京龙.MgO膨胀剂对超高性能混凝土收缩性能的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(10):3420-3427.
YANG Dongyang, CAO Hongyou, HUANG Jinglong. Effect of MgO expansive agent on shrinkage performance of ultra-high performance concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2022,41(10):3420-3427.
- [44] TAZAWA E I, MIYAZAWA S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete[J].Cement and Concrete Research,1995,25(8):1633-1638.